

[28] 鉱物質微粉末のコンクリート諸性質に及ぼす影響

正会員 森野 奎二 (愛知工業大学工学部)

1. まえがき

コンクリートに関わる鉱物質微粉末は、セメントと置換して使用される高炉スラグ粉末やフライアッシュなどと、骨材中に含まれる砕石微粉末（以下、石粉と称す）や泥土などにと二大別できる。いずれも産業副産物あるいは不純物として生じたものであるが、前2種類については、結合材および混和材としての魅力が大きいため、その使用量はますます増加しつつある。一方、石粉の活用は、20年以前に、鉱物質微粉末効果¹⁾として高い評価を受けたものの、その後の進展はあまり見られない。一部のマスコンクリートなどでの利用を除いて、一般的には精々骨材中に含まれていても、許容限度以下であれば、有害ではないという程度の消極的なものである。粘土に至っては、全く評価されない。ソイルセメントに於いて、粘土鉱物とセメントの遊離水酸化カルシウムとのボゾラン反応が認められているにも拘らず、コンクリート中では、そういった効果は、他のマイナス面のために注目されていない。

最近、河川産骨材の枯渇に伴って、石粉や泥土が骨材に混入する機会が多くなり、混入率も増加する傾向にある。この現状に対処するためには、微粉末の影響を十分に把握することが必要であるが、従来は概して前向きには評価されていない。この原因は、石粉が強度発現に寄与する良い性質を持っていても、ほとんどの場合に単位水量が増加して、耐久性や経済性に劣ること、あるいは、混和剤の性能を低下させることなどによる。が、何よりも微粉末の物理化学的性質が、原石の種類や、骨材生産工程によって、著しく変化することにあると思われる。評価するためには、多種多様な石粉や泥土について、ある程度の適否の判断が下せる位の基礎データの蓄積が必要である。現状では、系統だてて分類・整理するだけのデータに乏しい。本研究では、構成鉱物の異なる各種の微粉末について、それらがコンクリートにどのような影響を及ぼすかを調べると共に、粘土については、混入の影響だけでなく、粗骨材に付着した状態についても検討を加えた。

2. 実験の概要

使用したセメントは、普通ポルトランドセメントで、細骨材は、川砂、砕砂、および珪砂を実験項目ごとに使い分けた。粗骨材は砕石（最大寸法、20mm）を用いた。使用した石粉及び泥土の1例を表1に示す。石粉は、砕石ダストの0.15mm以上の粒子を除いたもの、実験室で骨材を粉碎して造ったもの等である。泥土は、市販粘土製品及び野外で採取したもの等である。各粉末については、X線回折、走査電顕およびPH測定等でその特徴を把握した。実施した実験の概要を表2に示す。各粉末の混入率は、ベースト実験では、セメントに対する比(外割)を5~30%とし、モルタル及びコンクリート実験ではセメント及び骨材に対する比率で表したが、すべて骨材と置換した。詳細は、各実験結果毎に記した。

3. 実験結果と考察

(1) 石粉がセメントベーストのフロー値と強度

表1 使用した微粉末の1例

粉末の種類 (原石の種類)	産地及び 入手年(例)	主要鉱物	比重	粉末度 (μ 値) (cm^2/g)
花崗岩	愛知	石英、長石、雲母	2.63	2750、2810
石英斑岩	滋賀	石英、長石、雲母	2.61	3250、3380
流紋岩	兵庫	石英、長石、雲母	2.67	7530
安山岩	大阪	輝石、長石、角閃石	2.60	2230、4560
輝緑岩	愛知	輝石、長石、緑泥石	2.70	3720、5230
カウ岩	三重	カウ石、蛇紋石、緑泥石	2.84	2900~3440
蛇紋岩	愛知	蛇紋石、緑泥石、輝石	2.68	3230~4090
片麻岩	愛知	石英、長石、雲母	2.62	4680
砂岩	愛知	石英、長石、雲母	2.65	3800
頁岩	岐阜	石英、長石、雲母	2.58	5570
粘板岩	岡山	石英、長石、雲母	2.60	3460
チャート	高知	石英	2.63	3190、3860
珪砂	愛知	石英、長石	2.65	4820
長石	愛知	微斜長石、正長石	2.62	3810
石灰岩	岐阜	方解石	2.71	3400
炭カル	試薬	炭酸カルシウム	2.69	9200
ドロマイト	粉末	方解石、ドロマイト	2.82	3800
カオリン	愛知	カオリナイト、ハロイサイト	2.60	10000以上
高炉スラグ	製鉄所	ベリコト、フェライト	3.56	3690

表2 実験の概要

種類	各種微粉末の混入の影響						粗骨材に付着した粘土の影響			
	セメントベースト		モルタル		コンクリート		コンクリート			
測定項目	フロー値	強度	凝結	フロー値	強度	スランプ	空気量	強度	ボゾラン反応	
目的	粉末の混入がベーストの流動性に及ぼす影響		水和反応に及ぼす影響		粉末の混入がモルタルの流動性と強度に及ぼす影響		粉末の混入がコンクリートの流動性と強度に及ぼす影響		粗骨材に付着した粘土との強度関係	粘土とCa(OH) ₂ 混合物の強度発現

に及ぼす影響

各種の粉末(P)をセメント(C)に対して、5~30%混合し、水(W)は $W/(C+P)=0.35$ の一定の割合で使用した。この配合では粉末が増加するほど、W/Cが大きくなり、セメント量も減少するので、強度は図1のように、すべての石粉において低下している。

図1では、石質の種類による強度差よりも、粉末度の違いによる差の方が明瞭である。例えば、炭カル(CaCO₃、方解石、ブレン値9100 cm³/g)と石灰岩(方解石、同3400 cm³/g)とを比較するとよく分かるが、炭カル混合ペーストの材令7日と28日の強度の伸びが大きく、91日では少ない。一方、石灰岩の強度は、91日の伸びが大きい。いずれも、91日強度では等しいが、強度発現状態が異なっている。同様に、標準砂(豊浦標準砂のまま使用したもの)と花崗岩(ブレン値2750 cm³/g)や珪砂(同4820 cm³/g)とを比較しても、上記の傾向がみられる。しかもこの場合には、石粉の含まれない標準砂は、W/C及びセメント量の減少と共に、7日強度の低下が著しいが、石粉の混入によって、7日強度の発現がよくなり、W/Cの増加による強度低下を緩和している。石粉による水和反応の促進は、材令28日まで続き、91日

では、初期材令で高い強度を示すものは長期の伸びが少ない傾向がみられる。

(2) 石粉及び粘土がセメントの凝結に及ぼす影響

微粉末は、更に早い時期のセメントの水和にどのような影響を及ぼすか、また粉末の種類によってどの程度の違いが生じるかをみるため、凝結試験を行った。方法は、セメント：粉末=1：2とし、標準軟度(6mm)を得るのに要する水量を求め、結果を表3に示した。一般的な傾向としては、粉末

度が高いほど、所要水量が増加して始発、終結が遅くなっている。その中で石灰石とカオリン粘土は、他の粉末と異なった結果を示している。石灰石の場合は、粉末度に関係なく始発、終結が早くなり、セメントの水和反応に化学的な影響を及ぼしていると言える。粘土は始発のみ早く終結は遅い。これは化学的要因と、使用水量の多さによる物理的要因との両方の影響であろう。その他、各粉末のPHを測定したが、強度発現や凝結との関係は不明瞭であった。

(3) 石粉及び粘土がモルタルのフロー値と強度に及ぼす影響

セメント：(砂+粉末)=1：2、フロー値 180±5一定のモルタルにおいて、粉末をセメント重量の5、10、20、30%、砂と置換した。砂の中に粉末が2.5~15%含まれていることになる。水量は、フロー値が180±5となるように調整した。試験結果を図2に示す。図2では、粉末の混入率が増えるほど、一定フロー値に要する水量が増加するが、この水量(W)をセメント量(C)で割って、W/Cで表した。水の増加割合は、粉末の種類によって異なる

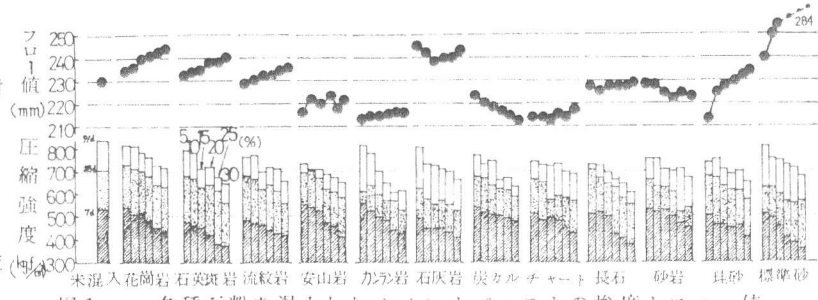


図1 各種石粉を混入したセメントペーストの強度とフロー値

表3 凝結試験

粉末の種類 (原石の名称)	ブレン 値 cm ³ /g	水量 (%)		始発 時-分	終結 時-分
		W C+P	W C		
セメント	3140	27.5	-	2-35	4-25
花崗岩	2360	26.9	80.1	4-12	8-01
流紋岩	7530	22.9	68.8	3-18	5-33
安山岩	2230	25.9	77.6	4-05	7-55
輝緑岩	3720	25.2	75.5	2-52	7-14
カル岩	2900	34.5	103.4	5-13	9-36
砂岩	3800	27.9	83.8	4-08	7-43
チャート	3190	24.0	72.1	4-10	8-17
珪砂	4820	31.6	94.9	4-34	8-22
長石	4030	29.8	89.5	4-11	6-53
石灰岩	3500	19.7	59.0	1-30	3-05
炭カル	9200	34.9	104.8	2-10	4-50
ドロマイト	3800	22.3	66.9	3-05	6-10
カオリン	10000	40.9	105.9	1-37	10-39
転石スラグ	3690	20.3	61.0	3-34	7-17

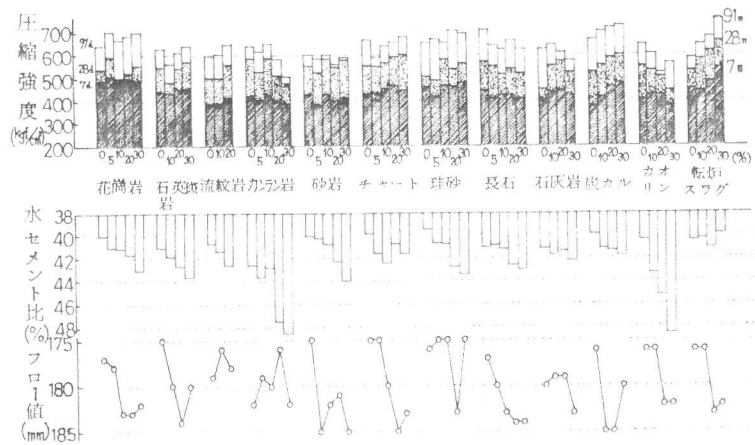


図2 各種石粉を混入したモルタルの流動性と強度

る。石灰岩及び炭酸カルシウムは水量の変化が少ない。粘土やかんらん岩粉末は、粉末量の増加と共に水量の増加が著しい。これらの粉末は他の石粉のように、造岩一次鉱物（石英、長石など）が主要成分となっておらず、造岩鉱物の風化によって生成する2次鉱物（カオリナイト、蛇紋石など）が主成分となっている。この鉱物の結晶形態は、板状（カオリナイト）及び繊維状（蛇紋石）で、かつ微細であるため、流動性が悪く、一定フロー値に要する水量が増す。一方、石灰岩や炭カル（共に、方解石）は粒状であるため流動性が良い。特に炭カルの粉末度は、 $9100\text{cm}^2/g$ と大きいにも拘らず流動性がよく、強度も高い。その他の石粉では、28、91日強度は、W/Cに比例して、粉末混入率と共に低下するものとW/Cの低下にかかわらず、混入率と共に強くなるものがある。どの石粉に於いても7日強度は、粉末混入によって強度が高くなっており、短期強度の促進には使用したすべての石粉が有効であることを示している。石粉ではないが、未利用資源である転炉スラグ粉末混入モルタルの強度は石粉よりも高い。これは、転炉スラグ自体に結合材としての性質があるためである。転炉スラグ特有の膨張による被害は現れなかった。

(4) 石粉がコンクリートのスランプと強度に及ぼす影響

コンクリートでは、多くの実験結果の中から、水セメント比55%、細骨材率45%、石粉混入率、全骨材に対して、3、6、9、12%（細、粗骨材中に2:1の比で置換）、水量、スランプ10cmに要する量（図3の下側に記載）とした配合の結果を図3に示す。図3では、石粉の混入率の増加と共に、強度は増加するが、スランプが小さくなるので、一定スランプに要する水量が増え、使用セメント量が増え、不経済となる。ただし、石灰岩及び片麻岩の6%混入までの結果は石粉混入によって、ワーカビリティが良くなっている。このことはこれらの石粉の粒子の形態が、粒状で表面も平滑なためであろう。

図示以外の多くの実験結果も参考にして判断すると、全体的な傾向としては、石粉を構成している粒子の形態（粒径、粒形、表面組織）が、ワーカビリティに及ぼす影響が大きく、また、岩質としては、 SiO_2 の少ない塩基性岩（輝緑岩、かんらん岩、蛇紋岩など）に特異な挙動を示すものが多いように思われる。 SiO_2 の多い酸性岩（花崗岩、砂岩など）は、平均的な状態を示し無難な感じを受ける。最も良質な石粉としては、石灰岩粉末を挙げる事ができる。好ましくない石粉は、粒子の形態が板状及び繊維状で、造岩鉱物の風化が進み、粘土鉱物に近い状態及び粘土鉱物を含んだ石粉である。

(5) 粗骨材に付着した粘土について

骨材に粘土が付着していると、セメントとの付着力が低下すると考

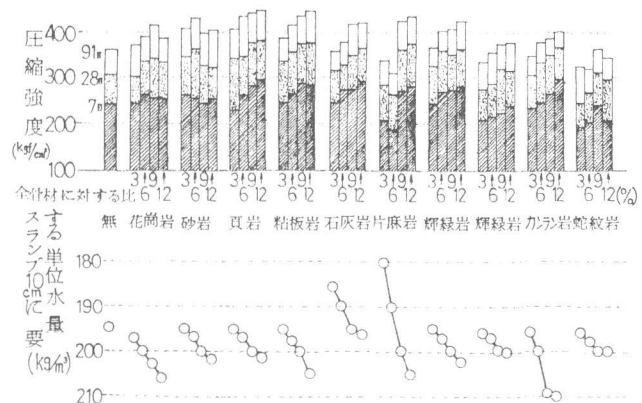


図3 各種石粉を混入したコンクリートの流動性と強度

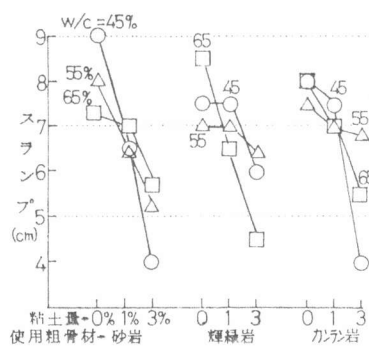


図4-1粘土付着骨材を用いたコンクリートのスランプ

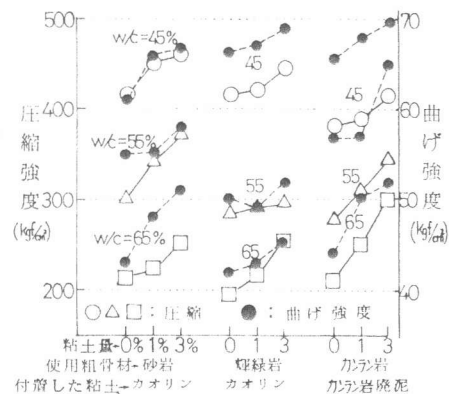


図4-2粘土付着骨材を用いたコンクリートの強度

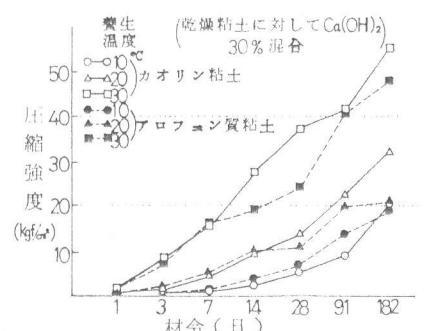


図5 粘土、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 混合物の強度

えられ、除去する努力は払われるが、完全な洗浄は行われ難いのが実情である。また実際に付着した粘土の影響を調べた文献もみられない。そこで、粗骨材に粘土を骨材の1%、3%付着（所定濃度の泥水に骨材を浸し、乾燥させた）させて、曲げ及び圧縮強度試験を行った。その結果を図4に示す。図では、粘土量と共にスランブが低下するが、コンクリート強度は曲げ、圧縮ともに増加している。これは、練り混ぜ中に粘土が剥離し、微粉末として作用して、強度増に寄与した面も多いであろうが、骨材の界面にはCa(OH)₂が介在する^{2),3)}ので、粘土が付着していると、粘土とCa(OH)₂がポゾラン反応して、本来、強度の弱点となるべき所が、改善されたとも考えられる。参考までに、粘土とCa(OH)₂を混合した混合物の強度を図5に示す。養生温度の影響が著しく、また、粘土鉱物の種類によっても相当異なっている。

(6) 石粉がAE剤の空気連行に及ぼす影響

一般に、骨材中に微粉末が多いとAE剤の空気連行量が減少するが、この減少の程度は石粉量、粉末度を同じにしても石質の種類によって異なり、また混和剤の種類によっても異なることが分かった。その実験結果を示す。実験は、粗骨材に砂岩砕石、細骨材に川砂（花崗岩系）、砕砂（蛇紋石をかなり含む塩基性岩）および水洗砕砂を用いた。石粉は砕砂中に含まれているもので0.15mm以下17%。そのうち0.088mm以下が15%である。水洗砕砂は、この石粉を水洗除去したものである。比較用に用いた石粉は、砂岩砕石工場より得た石粉である。使用した混和剤は、リグニンスルホン酸塩系AE減水剤（記号A,B）と天然樹脂酸塩系AE剤（記号C）である。

コンクリートのスランブ10cmにおける結果を図6に示す。連行空気量は砂の粒径、表面組織の異なる川砂と砕砂で相当異なると共に石粉による空気量の減少も著しいことが分かる。次に川砂に石粉を加え細骨材の粒形、

石質の影響を除き、また、水洗砕砂にも2種の石粉を加えて石粉だけの影響を明らかにしようとした。その結果を図7に示す。石粉の種類によって連行空気量の減少の程度が異なっており、石質の影響があると言える。

4 まとめ

1. コンクリートに、石粉や粘土が混入することは、コンクリート強度の発現に有効であるが、流動性を考慮すると、石質の種類によって、許容される混入量には違いがみられる。即ち、造岩一次鉱物が風化して、粘土鉱物およびそれに近くなった鉱物が含まれるほど、混入量を制限する必要がある。また、SiO₂の多い酸性岩粉末よりも、塩基性岩粉末の挙動が変化に富み、特に微粉末粒子の形態が、板状および繊維状のものは注意を要する。

2. 粗骨材に薄く少々付着した粘土は、粘土と骨材界面の水酸化カルシウムとのポゾラン反応を考慮すると、必ずしも悪影響を及ぼすとは限らない。ただしポゾラン反応の期待できる場合は、粘土鉱物と養生条件に恵まれたときである。

3. 微粉末は、AE剤の空気連行量を減少させる。減少の程度は、混入した微粉末量の影響が最も大きい。またこの程度は、AE剤の種類によって異なる。

参考文献

- 1) 山崎寛司：コンクリート・ライブラリー 第8号、1963年7月、P. 1-56
- 2) 岩崎訓明、富山泰全：セメント技術年報29、1975年、P. 131~134
- 3) Keiji, Morino: Transactions of the JCI Vol. 2, 1980, P109~116

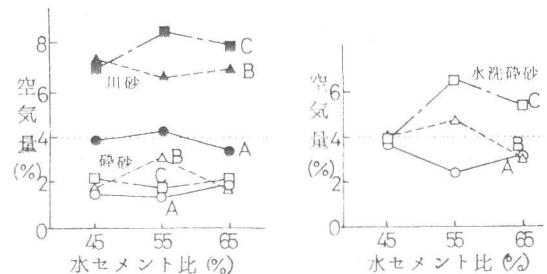


図6 細骨材および混和剤の種類と空気量の関係

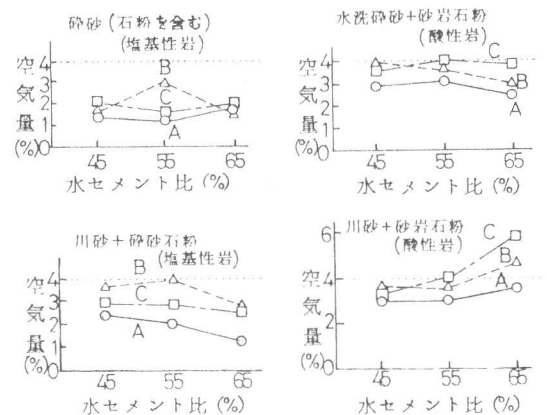


図7 石粉の種類が空気連行性能に及ぼす影響